

Касоян К.Ф.  
kasoyan.98@mail.ru

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ МАРКЕРОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

*Аннотация.* Дополненная реальность (AR) в настоящее время имеет высокую перспективу развития. В данной работе представлена разработанная система распознавания маркеров дополненной реальности. Использование ArUco маркеров позволит производить точное распознавание.

*Ключевые слова:* дополненная реальность, распознавание, маркеры ArUco, углы Эйлера.

*Abstract.* Augmented reality (AR) currently has a high development perspective. This article presents the developed augmented reality marker recognition system. Using ArUco markers will allow accurate recognition.

*Keywords:* augmented reality, recognition, ArUco markers, Euler angles.

Дополненная реальность представляет собой наложенную информацию, изображение или объект на физический мир с помощью дополнительных инструментов. С каждым годом данная технология становится более востребованной в различных областях. На сегодняшний день она активно используется в медицине при симуляции сложных хирургических операций, в образовании для лучшего восприятия поступающей информации, в проектировании для создания различных моделей, сооружений, зданий, в робототехнике и т.д. Технология дополненной реальности имеет большие перспективы развития и в ближайшем будущем. Также многие современные IT-технологии тесно связаны с задачами компьютерного зрения такими как распознавание, сегментация и детектирование образов, движение, восстановление сцен и изображений.

В данной работе будет разрабатываться система дополненной реальности с использованием маркерной технологии. Создаваемая система позволит распознать в режиме реального времени маркер, ранее созданный программным путем, а также вычислить угол его поворота с использованием углов Эйлера.

Анализ источников существующих приложений, устройств, технологий дополненной реальности с распознаванием определил их сильные и слабые

стороны. **LookInAr VR / AR Presentation** [1] – приложение, использующее дополненную (AR) и виртуальную (VR) реальности.

Основные возможности: выбор интересующего раздела: «Дом»: просмотр макета здания в режиме AR, проход VR-тур по квартире, детальный просмотр всех элементов планировки, мебель, полное погружение в атмосферу; «Мебель»: просмотр мебели в реальном времени на месте распечатанного маркера.

**Живые 3D метки** [2]- система распознавания маркеров дополненной реальности (*от англ. «augmented reality», сокращенно AR*) на базе оптического трекинга от компании EligoVision.

Основные возможности: появление виртуальных объектов (3D модель с анимацией, графический объект: текст, изображение или видео) при поднесении к камере маркера, нанесенного на какую-либо поверхность; проявление вращений, наклонов, перемещений метки перед камерой на 3D модель; взаимодействие между двумя и более метками.

**Учебно-методический комплекс по физике «Увлекательная реальность»** [3] – цифровое интерактивное методическое пособие для изучения физики с повышенным уровнем вовлечения в учебный процесс за счет технологий дополненной реальности, трехмерной графики и 3D-стереоскопии.

Основные возможности: изучение физики с помощью маркеров дополненной реальности; глубокое погружение обучающихся в среду проводимых экспериментов; детализация структуры и свойств исследуемых объектов; взаимодействие пользователя с виртуальными объектами; масштабируемость на другие научные дисциплины школьной программы; возможность проведения экспериментов без лабораторного оборудования; взаимодействие пользователя с виртуальными объектами дополненной реальности. с дополненной реальностью

**Учебник физики с дополненной реальностью** [4] – мобильное приложение для «оживления» страниц печатного учебника с помощью технологии дополненной реальности.

Основные возможности: распознавание изображения страницы в видеопотоке и в реальном времени, вывод по его координатам объектов с помощью маркеров дополненной реальности, которыми являются страницы школьного учебника, на которых, представлены анимированные 3D сцены и демонстрации процессов и явлений по изучаемой теме; индивидуальная демонстрация возможностей мобильной версии комплекса «Увлекательная

реальность» при работе с существующими печатными образовательными материалами.

**Visual Manual** [5]- виртуальный тренажер с дополненной реальностью.

Основные возможности: 3D-визуальные интерактивные системы обучения учеников профессиональных учреждений, специалистов и обслуживающего персонала; универсальная платформа для создания визуальных инструкций и руководств пользователя.

**Приложение Augment-Дополненная реальность** [6] – это тот ресурс, который позволяет использовать дополненную реальность на андроид. При помощи этого приложения пользователи могут во всех деталях рассмотреть и изучить объекты, которых на самом деле нет. Augment предоставляет своего рода макеты.

Основные возможности: демонстрация объектов, поддержка двухмерных и трехмерных моделей реальности, изменение размера модели или угла обзора пользователем в процессе использования приложения.

**Приложения ARLOOPA** [7] – ARLOOPA Inc. – компания по разработке приложений и игр для дополненной реальности (AR) и виртуальной реальности (VR), предоставляющая расширенные услуги AR и VR.

Основные возможности: разработка приложений и игр для виртуальной реальности; создание 2D и 3D контента ARLOOPA с использованием технологии дополненной реальности, распознавания изображений и компьютерного зрения.

**Приложение LiveLabels** [8]-приложение, позволяющее расширить рынки сбыта продукции за счет привлечения новой целевой аудитории, то есть тех, кто хорошо ориентируется в цифровых технологиях.

Основные возможности: при взаимодействии с товаром или услугой подключение дополненной реальности посредством смартфона, получив доступ к обширному пласту важного контента. Данный контент может быть полезным (инструкции по использованию продукта, проверка его уникальности, виртуальные путеводители) и/или развлекательным (поздравления с праздником, игры, воспроизведение музыки и видео); через камеру телефона показывается реальный мир, на который возможно наложить необходимые данные: любую цифровую информацию в зависимости от потребностей бизнеса. Это могут быть виртуальные карты, курсы валют, ссылки на сайт, инструкции и рецепты, поздравления, индивидуальные коммерческие предложения и онлайн-скидки.

Данные работы сравнивались по критериям:

– интерфейс аналога;

- точность распознавания маркера;
- наличие взаимодействия между маркерами в системе;
- реакция на наклоны и перемещения маркера системы;
- использование маркерной технологии при распознавании;
- простота маркера для распознавания;
- простота программной реализации;
- наличие примеров программного кода;
- цена исследуемого аналога.

В качестве прототипа была выбрана система распознавания маркеров дополненной реальности на базе оптического трекинга от компании EligoVision – «Живые метки». В данной системе производится обработка изображений, идентификация объекта, применение алгоритмов распознавания, получение информации об объекте и формирование дополненной реальности. Но в ней были выявлены некоторые недостатки. К ним относятся высокая стоимость, неточная идентификация маркеров. Для устранения этих недочетов была разработана система распознавания с использованием маркеров дополненной реальности.

Для разработки данной системы использовалась распознавание с применением маркерной технологии, которая более надежна и менее требовательна к вычислительным ресурсам используемых устройств в отличие от безмаркерной.

Маркером может являться любая фигура, но для лучшего распознавания выбирается черно-белый простой формы. На основе анализа систем распознавания предлагается использовать маркеры дополненной реальности ArUco – популярная технология для позиционирования робототехнических систем с использованием компьютерного зрения. Эта технология представляет собой квадратный маркер, состоящий из широкой черной границы и внутренней двоичной матрицы, которая определяет его идентификатор (id). Черная граница облегчает ее быстрое обнаружение в изображении, а двоичная кодификация позволяет идентифицировать ее и применять методы обнаружения и исправления ошибок. Размер маркера определяет размер внутренней матрицы. Также основное преимущество этих маркеров состоит в том, что один маркер обеспечивает достаточное количество соответствий (его четыре угла) для получения позы камеры [9].

Разрабатываемая система позволяет осуществить корректное распознавание маркера и определение угла наклона, вычисляемая с помощью

углов Эйлера [10], при существующих ограничениях веб-камеры, особенностях цветопередачи, освещении и вычислительной мощности оборудования.

Для работы с маркерами ArUco использовалась OpenCV (Open Source Computer Vision) – библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом, реализована на C/C++ [11]. Её функции в основном направлены на компьютерное зрение в реальном времени. Функционирует на языках программирования C++, Python и Java и поддерживает операционные системы MS Windows, Linux, Mac, iOS и Android. Области применения OpenCV: система распознавания лиц, жестов, взаимодействие человека с компьютером, понимание движения, идентификация объектов, дополненная реальность и т. д.

Также использовалась среда разработки приложений Microsoft Visual Studio 2017 Community [12] и язык программирования C++, который подходит для реализации системы распознавания маркеров дополненной реальности под ОС Windows и работы с библиотекой OpenCV.

В создаваемой системе распознавания маркеров дополненной реальности выполняются следующие этапы:

1. Создание маркера: на данном этапе производится генерация маркеров дополненной реальности и дальнейшее их сохранение в формате .png, из которых формируется словарь из 50 маркеров ArUco (рисунок 1). После необходимо распечатать маркеры на матовой бумаге для дальнейшего использования.

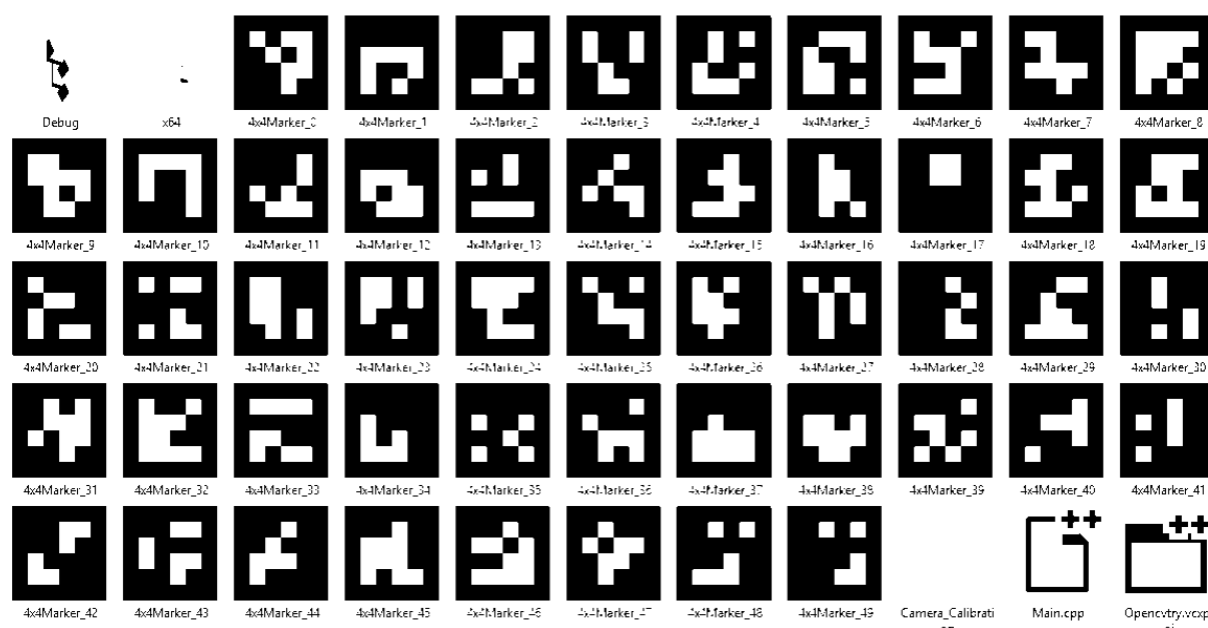


Рисунок 1 – Маркеры

2. Калибровка камеры: В данном пункте решается задача получения внутренних и внешних параметров по ранее отснятым на камеру фотографиям. Во время калибровки камеры происходит соответствие между трёхмерными точками сцены и пикселями изображения. Используя распечатанный шаблону шахматной доски 7x10, производится калибровка камеры путем создания его снимков. Шаблон должен быть распечатан на матовой бумаге для того, чтобы изображения в процессе калибровки были четкими. Распечатанный шаблон нужно прикрепить на жесткую, ровную поверхность, чтобы не получить искажение при создании снимков.

На данном шаблоне выделяются ключевые точки и линии, для которых известны размеры и положение в пространстве.

Результатом алгоритмов калибровки является внутренняя и внешняя калибровочные матрицы, и вектор значения дисторсии объектива.

Калибровка осуществляется для того, чтобы стали известны внутренние параметры камеры, такие как матрица камеры и коэффициенты дисторсии.

Матрицей камеры называется матрица вида:

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $(c_x, c_y)$ -координаты принципиальной точки (точки пересечения оптической оси с плоскостью изображения, в идеальной камере находятся точно в центре изображения, в реальных немного смещена от центра);  $f_x, f_y$ -фокусное расстояние  $f$ , измеренное в ширине и высоте пикселя.

Существуют два основных вида дисторсии:

- радиальная дисторсия- искажение изображения в результате неидеальности параболической формы линзы. Искажение, вызванные радиальной дисторсией, равны 0 в оптическом центре сенсора и возрастают к краям. Как правило, радиальная дисторсия вносит наибольший вклад в искажение изображения.
- тангенциальная дисторсия-искажения изображения, вызванные погрешностями в установки линзы параллельно плоскости изображения.

Для радиального коэффициента используются следующие формулы:

$$x_{corrected} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (2),$$

$$y_{corrected} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (3),$$

где  $(x, y)$ -первоначальное расположение пикселя;  $(x_{corrected}, y_{corrected})$ -расположение пикселя на скорректированном выходном изображении;  $k_1, k_2, k_3$ -коэффициенты радиальной дисторсии.

Для корректировки тангенциального искажения применяются формулы вида:

$$x_{corrected} = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (4),$$

$$y_{corrected} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \quad (5),$$

где  $p_1, p_2$ -коэффициенты тангенциальной дисторсии;

$$r^2 = x^2 + y^2. \quad (6)$$

Для преобразования единиц используется следующая формула:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (7),$$

Наличие  $w$  объясняется использованием гомографической системы координат ( $w = Z$ ). Неизвестными параметрами являются  $f_x, f_y$  и  $(c_x, c_y)$ , которые представляют собой оптические центры, выраженные в координатах пикселей. Если для обеих осей используется общее фокусное расстояние с заданным соотношением сторон (обычно 1), то  $f_y = f_x * a$  и в предыдущей формуле будет одно фокусное расстояние  $f$ . Хотя коэффициенты искажения одинаковы независимо от использования разрешений камеры, их следует масштабировать вместе с текущим разрешением от калибровочного разрешения.

Процесс определения этих двух матриц является калибровкой. Расчет этих параметров осуществляется с помощью основных геометрических уравнений. Используемые уравнения зависят от выбранного объекта калибровки. В данном случае это классическая черно-белая шахматная доска [13].

Далее производится съемка этого шаблона с помощью камеры и производится их поиск с помощью OpenCV. Каждый найденный паттерн приводит к новому уравнению. Для решения уравнений необходимо заданное количество снимков шаблона, чтобы сформировать правильную систему уравнений. В данном случае приводится 15 снимков входного паттерна в различных положениях.

Так как для каждой камеры калибровка выполняется один раз, то данные о калибровке сохраняются в файл. В дальнейшем эти данные будут использоваться при распознавании маркеров. На рисунке 2 приведена демонстрация найденных углов калибровочного шаблона.

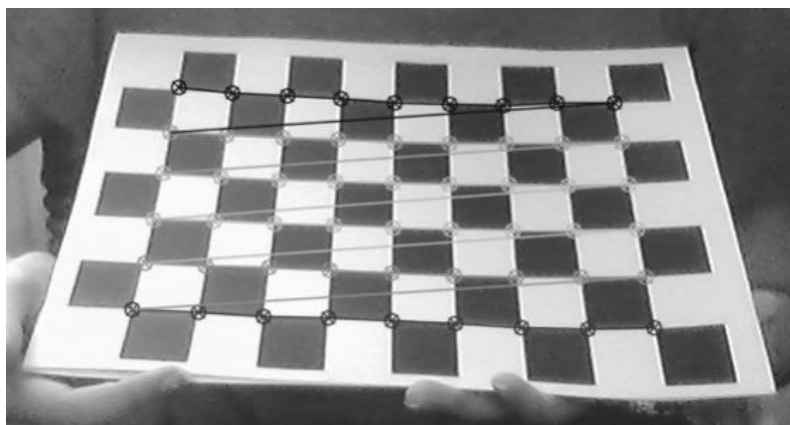


Рисунок 2 – Демонстрация найденных углов

3. Распознавание маркеров: в режиме реального времени производится обнаружение маркеров. В процессе обнаружения возвращается список обнаруженных маркеров. Каждый обнаруженный маркер включает в себя:

- положение его четырех углов на изображении (в исходном порядке);
- идентификатор маркера.

Процесс обнаружения маркеров состоит из двух основных этапов:

- 1) Обнаружение маркеров-кандидатов. На этом этапе изображения анализируются, чтобы найти квадратные фигуры, которые являются кандидатами в маркеры. Данный процесс начинается с адаптивного порогового значения для сегментирования маркеров, затем контуры извлекаются из порогового изображения. Не выпуклые или не приближенные к квадратной форме отбрасываются.
- 2) После обнаружения кандидата необходимо определить, действительно ли они являются маркерами. Это проверяется путем анализа их внутренней кодификации. Данный шаг начинается с извлечения битов маркера каждого маркера. Для этого сначала применяется перспективное преобразование для получения маркера в его канонической форме. Затем каноническое изображение подвергается пороговой обработке для разделения белого и черного битов. Изображение делится на разные ячейки в соответствии с размером маркера и размером границы. Количество черных или белых пикселей в каждой ячейке подсчитывается, чтобы определить, является ли он белым или черным битом. После биты анализируются, чтобы определить принадлежность маркера к конкретному словарю.

Далее у идентифицированного маркера производится оценка положения, для которой необходимо знать параметры калибровки используемой камеры. К



этим параметрам относятся матрица камеры и коэффициенты искажения. Позиция камеры относительно маркера представляет собой трехмерное преобразование координатной системы маркера к координатной системе камеры. Оно задается поворотом и вектором сдвига.

Система координат маркера размещается в центре маркера с направленной осью Z.

4. Определение угла наклона маркера: для описания поворота в трехмерном пространстве используются следующие параметры:

- матрицу поворота 3x3 (матрица вращения);
- три угла, например углы Эйлера( $\gamma, \beta, \alpha$ );
- угол поворота  $\theta$  и единичный вектор оси вращения

$$\hat{v} = (x, y, z) \quad (8),$$

- кватернион.

Для того, чтобы определить угол наклона необходимо:

- из вектора поворота получить матрицу поворота;
- преобразовать матрицу поворота в углы Эйлера.

Матрицами поворота вокруг оси декартовой правосторонней системы координат на угол  $\alpha$  в трёхмерном пространстве являются:

- вращение вокруг оси x:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (9),$$

- вращение вокруг оси y:

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (10),$$

- вращение вокруг оси z:

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11),$$

Матрица поворота вектора в декартовой системе координат выглядит следующим образом:

$$M(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (12).$$

Воспользовавшись функцией Rodrigues(), из вектора поворота 3x1 позволяет получить матрицу поворота 3x3.

На рисунке 3 демонстрируется работа вычисления угла наклона маркера.

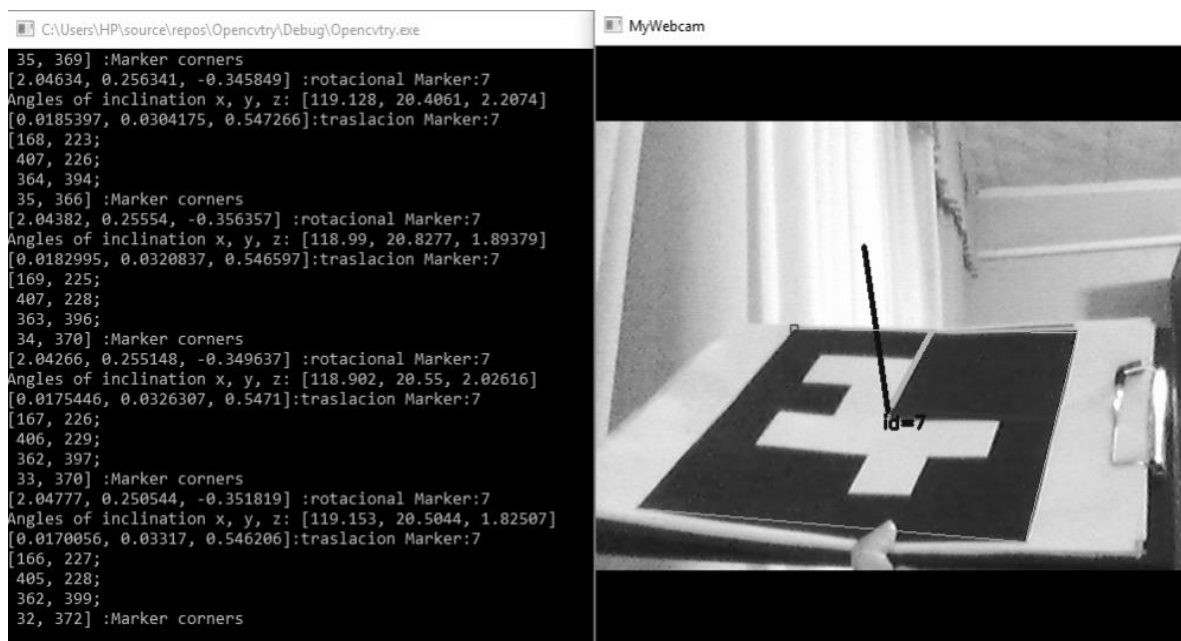


Рисунок 3 – Определение угла наклона

В результате проделанной работы получено приложение, которое позволяет производить корректное распознавание маркера дополненной реальности и определение угла наклона в реальном времени. Данная система в дальнейшем может применяться для создания 3d моделей, навигации в пространстве, в образовательных целях, в медицине, промышленности, робототехнике и т.д.

### ***Библиографический список***

1. LookInAr VR : офиц. сайт / AR Presentation. – URL: <https://lookinar.com> (date of access: 10.08.2019).
2. Живые 3D метки. – URL: <http://eligovision.ru/ru/know-how/markers/> (дата обращения: 10.08.2019).
3. Увлекательная реальность : учеб.-метод. комплекс по физике. – URL: <https://funreality.ru/lp/> (дата обращения: 10.08.2019).
4. Учебник физики с дополненной реальностью. – URL: [https://funreality.ru/product/ar\\_textbook/](https://funreality.ru/product/ar_textbook/) (дата обращения: 10.08.2019).
5. Visual Manual. – URL: <https://funreality.ru/product/visualmanual/> (date of access: 10.08.2019).
6. Приложение Augment-Дополненная реальность. – URL: <https://www.augment.com> (дата обращения: 10.08.2019).
7. Приложения ARLOOPA. – URL: <http://arloopa.com> (дата обращения: 10.08.2019).

8. Приложение LiveLabels. – URL: <https://packbel.by/mag/novosti-kompanij2/tipografiya-fleks-n-roll-vnedryaet-tehnologiyu-dopolnitelnoj-realnosti-dlya-biznesa> (дата обращения: 10.08.2019).
9. Detection of ArUco Markers. – URL: [https://docs.opencv.org/3.4/d5/dae/tutorial\\_aruco\\_detection.html](https://docs.opencv.org/3.4/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html) (date of access: 10.08.2019).
10. Журавлев В. Ф. Основы теоретической механики / В. Ф. Журавлев. – 2-е изд. – Москва : Физматлит, 2001. – 321 с.
11. OpenCV documentation. – URL: <https://docs.opencv.org/2.4/index.html> (date of access: 10.08.2019).
12. Установка Visual Studio 2017 Community. – URL: <https://info-comp.ru/programirovanie/568-install-visual-studio-community-2017.html> (date of access: 10.08.2019).
13. Camera calibration With OpenCV documentation OpenCV 2.4.13.7. – URL: [https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera\\_calibration/camera\\_calibration.html](https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html) (date of access: 10.08.2019).